

物理实验



基于 Arduino 单片机的金属杨氏模量测量实验

马淋漓¹ 王晓杰^{1,2}(南开大学¹物理科学学院; ²基础物理国家级实验教学示范中心(南开大学), 天津 300071)

摘要 杨氏模量测量是大学物理实验中很重要的基础实验。本论文基于 Arduino 设计了一种利用光杠杆放大法测量金属杨氏模量的实验装置及方法, 引入光敏电阻测量黄铜棒在不同受力情况下产生的微小形变, 结果表明实验测量精度相对较高。通过该实验设计, 能够有效激发学生实验兴趣, 锻炼学生动手能力, 培养学生创新能力。

关键词 Arduino; 金属; 杨氏模量

MEASUREMENT EXPERIMENT OF YOUNG'S MODULUS OF METAL BASED ON ARDUINO MICROCONTROLLER

MA Linli¹ WANG Xiaojie^{1,2}(¹ School of Physics; ² National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract Young's modulus measurement is one of the most important basic experiments in university physics experiments. This paper designs an experimental device and method based on Arduino to measure the Young's modulus of metal by using the optical lever amplification method, and introduces a photosensitive resistor to measure the small deformation of the brass rod under different stress conditions. The results show that the experimental measurement accuracy is relatively high. Through this experimental design, it can effectively stimulate students' interest in experiments, exercise students' hands-on ability, and cultivate students' innovative ability.

Key words Arduino; metal; Young's modulus

传统大学物理实验教学的授课方式主要是实验指导老师实验室给学生讲解实验原理、操作方法以及注意事项, 然后学生根据老师的讲解操作实验仪器, 记录实验数据, 进行数据分析, 最后书写实验报告^[1]。这种教学模式固然保证了学生操作实验的规范性以及实验的成功性, 但是却极大降低了学生进行探索的自主性, 导致实验过

程枯燥、乏味, 这十分不利于培养学生对探索研究的兴趣。并且, 在这种按照讲义一步一步“手把手”地教学生做实验的教学方式下, 学生在课堂上吸收到的知识是有限的, 完全是被动地接收知识; 认真预习的同学还可能有所收获, 而没有预习的学生所获得知识和技能就太少了。其结果就是, 很多学生在实验结束后可能仍然对整个实验过程

收稿日期: 2023-07-13

基金项目: 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会课题(DJZW202310hb, WX202206); 教育部产学研合作协同育人项目(220905259141912); 南开大学本科教改项目(NKJG2023048, NKJG2023107, NKJG2022096, 22NKSFK05)。

通讯作者: 王晓杰, 男, 助理研究员, 主要从事物理教学科研工作, 研究方向为非线性光学, wxj@nankai.edu.cn。

引文格式: 马淋漓, 王晓杰. 基于 Arduino 单片机的金属杨氏模量测量实验[J]. 物理与工程, 2023, 33(6): 54-59.

Cite this article: MA L L, WANG X J. Measurement experiment of Young's modulus of metal based on Arduino microcontroller[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(6): 54-59. (in Chinese)

一知半解,并未对知识点学习透彻。

Arduino 是一套能感知和控制物理现实世界的工具,它基于开源的开发板和扩展板,有着自己专门的开发环境,同时配有大量可以检测各种物理量的传感器以及各种用途的其他电子器件。除此之外,Arduino 还同时兼备成本低廉和容易上手等特点,因此非常适合应用于实验探索和研究。学生可以利用 Arduino 以及各种用途的电子器件改进实验^[2]。

“杨氏模量的测量”是大学物理实验中非常重要的实验^[3]。其中待测样品微小形变的测量是该实验的重中之重。杨氏模量是材料的一个重要物理量,用于描述材料的弹性性质。它是刻画材料抵抗变形的能力的量度,常用于研究材料的力学性质和工程设计中。在杨氏模量测量实验中,一根长而细的材料样品被悬挂在固定的支架上,上面挂着一个重物。通过施加一个垂直于样品的力,使样品发生弯曲。测量悬挂线与材料样品之间的伸长量,以及材料样品的尺寸和几何参数,可以计算出杨氏模量。这个实验可以帮助学生理解材料的弹性性质,探索材料的力学行为,并为工程设计和材料选择提供重要的参考依据。

目前,大学物理实验中测量杨氏模量的方法通常有静态拉伸法^[4]、动态共振法^[5]、梁弯曲法^[6]以及干涉条纹法^[7]。其中,静态拉伸法又可分为光学测量和电学测量两大类。动态共振法又可分为普通共振法、负载动态法、激光双光栅法等几类。梁弯曲法可分为激光光杠杆放大测量、单缝衍射法、霍尔传感器测量法及光纤布拉格传感器法等^[8,9]。但是,这些方法的实验仪器结构复杂,学生在进行实验的时候对其原理难以了解透彻,且过程枯燥无味,会使学生缺乏探究兴趣。

为解决此现状,本论文设计了基于 Arduino 单片机的金属杨氏模量测量实验,旨在提升学生兴趣,帮助学生熟练地掌握实验中的各种知识和技能,化“被动”为“主动”,让学生在不断探索的过程中,积极自觉地收获知识。

1 实验原理

如图 1 所示,设厚度为 d 、宽度为 a 的均匀的长方体金属棒,两端自由置于一对平行刀口上,刀口间距为 L ,中间悬挂质量为 m 的砝码,在弹性限

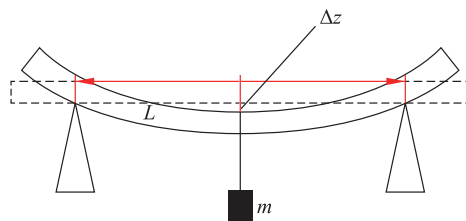


图 1 梁弯曲法测量杨氏模量原理图

度内,如不计金属棒自身重量,设挂码处下降 Δz ,则当 Δz 远远小于 L 时,金属棒的杨氏模量 E 满足^[3]

$$\frac{F}{s} = E \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

$$E = \frac{L^3 mg}{4d^3 a \Delta z} \quad (2)$$

其中, Δz 是个微小量,较难精确测量,因此一般采用光杠杆将其放大然后进行测量。

图 2 为光杠杆原理图。一束激光由激光器发出后,经过平面镜反射后,入射到光敏电阻中。设光杠杆常数为 b ,光敏电阻到平面镜的水平距离为 B ,光源到光敏电阻接收到经平面镜反射的光信号所在位置的垂直距离为 ΔH ,待测金属丝受力后平面镜偏转角度为 θ ,则有

$$\sin \theta = \frac{\Delta z}{b} \approx \theta \quad (3)$$

$$\tan 2\theta = \frac{\Delta H}{B} \approx 2\theta \quad (4)$$

$$\Delta z = \frac{\Delta H b}{2B} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)得到

$$E = \frac{L^3 B m g}{2 \Delta H d^3 a b} \quad (6)$$

设光源初始高度为 H_0 ,光敏电阻检测到经平面镜反射的光信号的高度为 H 。则 $\Delta H =$

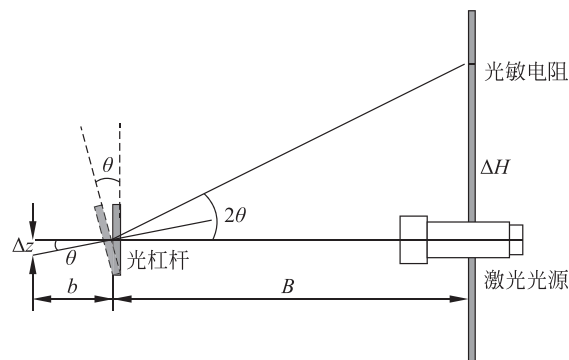


图 2 光杠杆原理示意图

$H - H_0$, 代入式(6)可得

$$E = \frac{L^3 Bmg}{2(H - H_0)d^3 ab} \quad (7)$$

由式(7)可得

$$H = \frac{L^3 Bg}{2Ed^3 ab}m + H_0 \quad (8)$$

式(8)中 H_0 无法精确测量, 可通过如下方法解决。设现有两组数据: 黄铜棒有效长度中点悬挂砝码质量 m_i 对应光敏电阻检测到光信号的高度 H_i , 质量 m_{i+1} 对应高度 H_{i+1} , 代入式(8)得到

$$H_i = \frac{L^3 Bg}{2Ed^3 ab}m_i + H_0 \quad (9)$$

$$H_{i+1} = \frac{L^3 Bg}{2Ed^3 ab}m_{i+1} + H_0 \quad (10)$$

式(10)减去式(9)得到

$$\Delta H_i = \frac{L^3 Bg}{2Ed^3 ab}\Delta m_i \quad (11)$$

其中, $\Delta H_i = H_{i+1} - H_i$, $\Delta m_i = m_{i+1} - m_i$ 。

由式(11)可知, 可以选定一特定质量 m_1 作为初始质量, 其对应的光敏电阻检测到经平面镜反射的光信号的高度为初始高度 H_1 。然后测量一系列质量 m_i 对应的高度 H_i 。再求得一系列质量差 $\Delta m_i = m_i - m_1$ 对应的高度差 $\Delta H_i = H_{i+1} - H_1$, 并对所得数据进行线性拟合, 求出其拟合方程的斜率, 即可求得黄铜的杨氏模量 E 。此方法不仅可以减少光敏电阻移动过程产生的误差, 同时也解决了光源起始高度 H_0 的测量问题。

2 实验硬件设计

2.1 主控电路

Arduino 的开发硬件主要包括开发板和扩展板(能够实现特殊功能的开发板)。常用的开发板有 Arduino Uno、Arduino Nano、Arduino Mega2560……其中 Nano 开发板体积最小; Mega 开发板体积最大, 功能也最强; 而 Uno 开发板介于两者之间, 是开发者在研发过程中最常用的开发板。与 Nano 开发板相比, Uno 开发板的功能更加齐全。与 Mega 开发板相比, Uno 开发板的价格更加低廉且其功能以足够应用于大部分程序开发。因此本论文选择 Uno 开发板进行实验设计。

2.2 光敏电阻模块

本实验使用四针光敏电阻模块, 其共有四个

端口, 分别是 VCC、GND、DO 和 AO。实验开始前, 将 VCC 端口连接至 Arduino Uno 3.3V 管脚; 将 GND 端口连接至 Arduino GND 管脚; 将 DO 端口连接至 Arduino 数字引脚 5; 将 AO 端口连接至 Arduino 模拟引脚 A0(见图 3)。

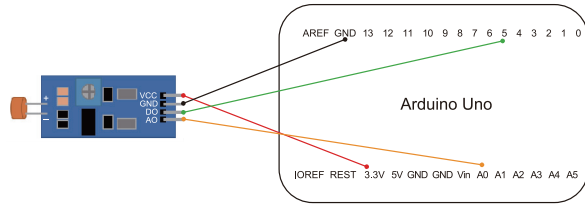


图 3 光敏电阻模块连线图

编写代码测试模块是否正常运行, 其代码如下:

```
int DO=5;
int AO=A0;

void setup() {
    pinMode(DO, INPUT); //配置数字引脚 5 设置为输入模式
    pinMode(AO, INPUT); //配置模拟引脚 A0 为输入模式
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {
    Serial.println(digitalRead(DO)); //输出数字引脚 5 的值, 输出值为 0 或 1
    Serial.println(analogRead(AO)); //输出模拟引脚 A0 的值, 输出值为 0~1023

    delay(200);
}
```

2.3 步进电动机

本实验将使用 DM42L 驱动器驱动 57 步进电动机, 采用共阳极接线法, 其连线方法如图 4 所示。其中:

(1) 步进电动机的四根线一一对应地连接至驱动器 A+、A-、B+、B- 端口;

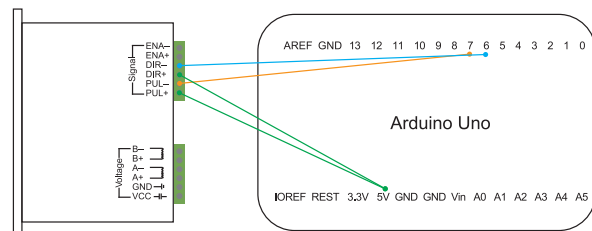


图 4 步进电动机连线图

(2) 驱动器 VCC 端口连接至外接电源正极, 驱动器 GND 端口连接至外接电源负极, 接入 9V 电压;

(3) PUL-连接至 Arduino Uno 数字管脚 7, DIR-端口连接至数字管脚 6;

(4) 使用面包板, 将 PUL+ 和 DIR+ 一同连接至 Arduino Uno 5 V 管脚。

(5) 编写代码控制步进电动机, 代码如下:

```
int PUL=7;
int DIR=6; //定义 PUL 和 DTR 对应的管脚
#define steps 1600 //实验所用步进电动机每旋转 360°,
                电机前进 1600 步

void setup() {
    pinMode(PUL, OUTPUT);
    pinMode(DIR, OUTPUT); //配置数字引脚 6、7 为输出模式
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {
    for(int i=0; i<steps; i++){
        digitalWrite(DIR, HIGH); //控制电机方向 HIGH
                                正转, LOW 反转
        digitalWrite(PUL, HIGH);
        delayMicroseconds(500);
        digitalWrite(PUL, LOW);
        delayMicroseconds(500); //两个 delayMicroseconds()
                                函数控制步进电动机的速度
    }
    //该程序运行后, 步进电动机将一直正转, 直至程序
    被人为停止或步进电动机断电。如需反转, 需要
    变更 DIR 所接引脚的电平为 LOW
```

2.4 SGX 单线轨直线模组

SGX 单线轨直线模组采用 57 步进电动机驱动。通过程序设定步进电动机每毫秒前进 1 步, 则前进 1600 步需要 1600ms 即 1.6s。因此步进电动机每 1.6s 转动 360 度, 滑台行进 $x=3.5\text{mm}=3.5\times 10^{-3}\text{m}$, 设滑台行进的速度为 v , 则运行速度为 $v=x/t\approx 2.19\times 10^{-3}\text{m/s}$ 。

利用 Arduino 单片机控制步进电动机代码如下:

```
int PUL=7;
int DIR=6;
int DO=5;
```

```
int AO=A0; //定义引脚
unsigned long time;
#define steps 1600

void setup() {
    pinMode(PUL, OUTPUT);
    pinMode(DIR, OUTPUT);
    pinMode(DO, INPUT);
    pinMode(AO, INPUT);
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {
    for(int i=0; i<steps; i++){
        digitalWrite(DIR, HIGH); //HIGH 正转, LOW
                                反转
        digitalWrite(PUL, HIGH);
        delayMicroseconds(500);
        digitalWrite(PUL, LOW);
        delayMicroseconds(500);
        if(digitalRead(DO)==1){
            Serial.println(analogRead(time));
        } //如果检测到光线, 则输出运行时间
    }
}
```

3 实验探究

实验硬件包括激光光源($\lambda=532\text{nm}$)、Arduino Uno 开发板、光敏电阻模块(4 针)、直流稳压电源(0~24V)、步进电动机驱动器(DM42L)、SGX 单线轨直线模组(丝杆精度 0.03mm、重复定位精度 0.05mm)、待测黄铜棒、面包板, 及杜邦线若干。其实验装置示意图如图 5 所示。

3.1 实验方法

本实验的实验步骤如下:

- (1) 用直尺测量光杠杆常数 b 以及铜棒的有效长度 L , 用游标卡尺测量铜棒的厚度 d 和宽度 a ;
- (2) 以铜棒作为实验样品, 按照图 5 实验装置图组装好实验仪器;
- (3) 用直尺测量光敏电阻到光杠杆的水平距离为 B 五次;
- (4) 用支架支撑好金属棒, 并在有效长度的中点上挂上带有砝码的刀口(确保刀口挂在中心位置处);
- (5) 启动 Arduino, 开始烧录程序, 控制 SGX

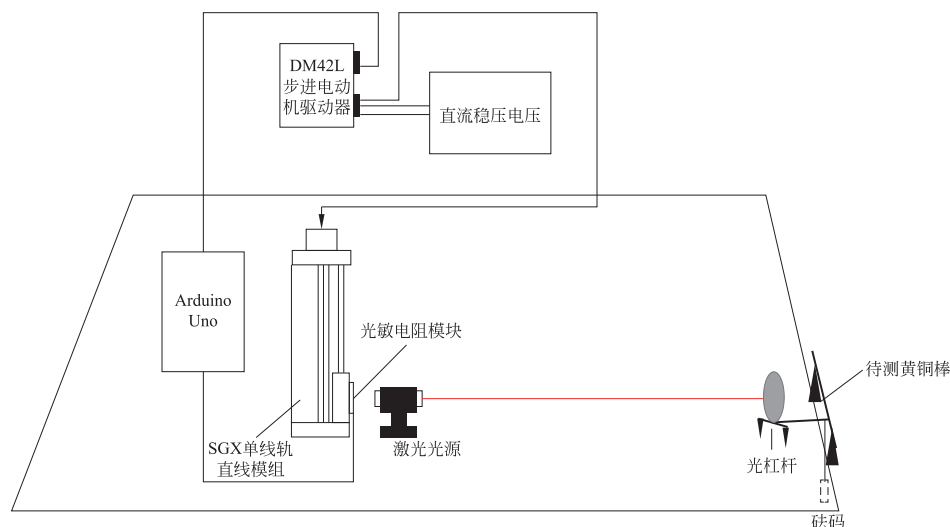


图5 实验装置示意图

单线轨直线模组滑块进行上下移动,每次向上移动时,读取检测到光信号的时间 t ;每次向下移动至初始位置时,按下 Arduino Uno 开发板上的重置按钮;

(6) 在 SGX 单线轨直线模组每上下扫描三次,更换一次砝码;

(7) 分别读取挂上 20.0g、40.0g、50.0g、70.0g、100.0g、150.0g 砝码时检测到光信号的时间 t ,每个砝码各测量三次。

3.2 实验结果分析

利用直尺测量刀口的有效长度 $L=24.35\text{cm}$,光杠杆常数 $b=11.36\text{cm}$,光敏电阻到光杠杆的水平距离 $B=112.76\text{cm}$ 。利用游标卡尺测量黄铜棒的厚度 $d=1.50\text{mm}$,黄铜棒的宽度 $a=1.50\text{mm}$ 。已知重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ 。

不同质量重物下,光敏电阻读取检测到光信号的时间 t 如表 1 所示。

表1 不同质量重物下,光敏电阻读取检测到光信号的时间

质量 m/g	第一次 测量时间 t/s	第二次 测量时间 t/s	第三次 测量时间 t/s
20.0	16.133	16.285	16.098
40.0	17.884	17.692	17.774
50.0	18.758	18.367	18.734
70.0	20.508	20.669	20.831
100.0	23.133	23.324	23.299
150.0	27.508	27.712	27.394

进一步可以计算得到不同质量差 Δm 时的时间差 Δt ,并利用 SGX 单线轨直线模组的速度,可以得到高度差 ΔH ,结果如图 6 所示。对数据进行线性拟合,得到拟合方程为 $\Delta H=0.192\Delta m-0.034$,其中 $R^2=0.999$,说明拟合度较高。

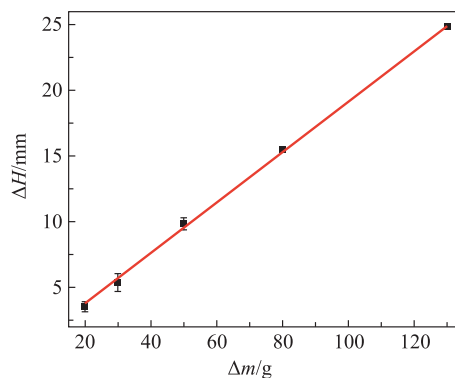


图6 不同质量差时光敏电阻高度变化

由式(11)和拟合方程可知 $\frac{L^3 Bg}{2Ed^3 ab}=0.192$ 。由此求得,黄铜杨氏模量为 $E=10.25\times 10^{10}\text{N/m}^2$ 。已知黄铜杨氏模量的标准值 $E_0=10.55\times 10^{10}\text{N/m}^2$ [10],可以求出本实验的相对误差 $\eta=\frac{|E-E_0|}{E_0}\times 100\%=2.8\%$ 。

4 结语

本实验结合了 Arduino 单片机进行大物物理实验测量,实验通过基于光杠杆原理的梁弯曲法,引入

光敏电阻测量黄铜棒在不同受力情况下产生的微小形变,并求得黄铜的杨氏模量 $E=10.25 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 。实验相对误差为 2.8%,实验测量精度相对较高,说明实验设计较为合理。通过该实验设计,能够有效激发学生实验兴趣,锻炼学生动手能力,培养学生创新能力。此外,本文提供的方法和实验手段易于在本科生基础物理实验中实现和推广。

参 考 文 献

- [1] 张燕,谢卫东. 大学物理实验教学考核现状及分析[J]. 科技风, 2021, (36): 28-30.
ZHANG Y, XIE W D. Current situation and analysis of college physics experiment teaching assessment[J]. The Wind of Science and Technology, 2021, (36): 28-30. (in Chinese)
- [2] 许金,李炬,叶懋,等. 基于 Arduino 的可见光浊度检测创新实验设计[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(8): 57-60,64.
XU J, LI H, YE M, et al. Design of innovative experimental for visible light turbidity detection based on Arduino[J]. Experimental Technology and Management, 2019, 36(8): 57-60, 64. (in Chinese)
- [3] 刘子臣. 大学基础物理实验:力学,热学及分子物理分册[M]. 天津:南开大学出版社, 2001.
LIU Z C. College Fundamental Physics Experiments: Mechanics, Thermal and Molecular Physics Volume [M]. Tianjin: Nankai University Press, 2001. (in Chinese)
- [4] 黄菊,梁小冲. 拉伸法测钢丝杨氏模量实验仪器的改进[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(5): 178-180,184.
HUANG J, LIANG X C. The Improvement of Young's Modulus Experiment Device for Measuring Metals by Stretch Method[J]. Experiment Science and Technology, 2018, 16(5): 178-180, 184. (in Chinese)
- [5] 刘盛循,邓小伟,吴益文,等. 基于多阶固有频率的动态法弹性模量精确测量[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(8): 39-42.
LIU S X, DENG X W, WU Y W, et al. Accurate Elastic Modulus Measurement Based on Multi-order-frequency Dynamic Method[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(8): 39-42. (in Chinese)
- [6] 宋连鹏,孙瑜,刘玉鹏,等. 弯曲法测量圆柱形试样杨氏模量的研究[J]. 物理实验, 2016, 36(6): 22-26.
SONG L P, SUN Y, LIU Y P, et al. Measuring Young modulus of cylindrical specimen by bending a beam[J]. Physics Experimentation, 2016, 36(6): 22-26. (in Chinese)
- [7] 曹旭,王杰,元凯,等. 干涉法测量橡胶材料杨氏模量的研究[J]. 大学物理, 2017, 36(3): 40-43.
CAO X, WANG J, QI K, et al. Research on interferometry measuring Young's modulus of rubber materials[J]. College Physics, 2017, 36(3): 40-43. (in Chinese)
- [8] 段阳,杨浩林,伍泓锦,等. 杨氏弹性模量测量实验综述[J]. 物理与工程, 2020, 30(3): 89-102.
DUAN Y, YANG H L, WU H J, et al. Review of the experiments of Young's modulus measurement[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(3): 89-102. (in Chinese)
- [9] 沙金巧,杨俊义,范君柳,等. 利用衍射法自动测量金属的弹性模量[J]. 物理与工程, 2023, 33(1): 147-150.
SHA J Q, YANG J Y, FAN J L, et al. Automatic measurement of elasticity modulus of metal by diffraction method[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(1): 147-150. (in Chinese)
- [10] 滕继慧,崔金玉,孙炳全,等. 基于单缝衍射原理的梁弯曲法杨氏模量的测量[J]. 物理通报, 2022, (9): 128-132.
TENG J H, CUI J Y, SUN B Q, et al. Measuring Young's modulus using beam bending method based on single slit diffraction principle[J]. Physics Bulletin, 2022, (9): 128-132. (in Chinese)